第46卷 第12期
2023年12月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 12
Dec. 2023

1955—2021年黄土高原地区相对湿度时空演变规律

安 彬[1,2]， 肖薇薇[1]， 刘宇峰[3]， 刘全玉[1]

（1. 安康学院旅游与资源环境学院，陕西 安康 725000； 2. 华东师范大学地理科学学院，上海 200241；
3. 咸阳师范学院地理与环境学院，陕西 咸阳 712000）

摘 要：黄土高原是我国气候变化敏感区，研究该区相对湿度（RH）时空演变及其与地理因子、气象要素之间的关系，有利于全面了解黄土高原气候变化规律。基于黄土高原及其周边地区90个气象站点逐日RH观测资料，利用趋势分析、敏感性分析和空间插值等方法，分析了1960—2021年及生态工程实施前后RH变化特征。结果表明：(1) 时间上，黄土高原地区年均RH为57.66%，以−0.376%·$(10a)^{-1}$速率显著减少（$P<0.05$），经历了“减弱−增强−减弱”年代际变化特征；除秋季以微弱幅度增大外，其他季节皆呈减少趋势，且减少幅度春季最高[−0.945%·$(10a)^{-1}$]，冬季最少[−0.194%·$(10a)^{-1}$]。(2) 空间上，黄土高原年及春夏秋季平均RH皆呈自南向北逐渐降低，而冬季表现为南部最高、中北部自东向西逐渐降低；年均及四季平均RH变化趋势空间态势各异。(3) 在黄土高原生态工程实施后，年及春夏冬季平均RH不同程度减少，年及夏冬季的趋势变化皆由增大转为减少；所有时序RH均值及趋势变化的空间特征存在较大差异，最典型的趋势变化组合类型是一致偏低型。(4) 引起黄土高原年均RH长期变化的主要季节因素是春季，空间上则主要是春季主导型、春夏季组合主导型。(5) 黄土高原年均及四季平均RH与纬度呈极显著负相关（$P<0.01$），与降水量呈极显著正相关（$P<0.01$），夏季平均RH受各地理因子的协同作用最为明显；年及春夏季平均RH对平均气温最为敏感，秋冬季对风速最为敏感。

关 键 词：相对湿度（RH）；年代际变化；季节贡献率；敏感性分析；生态工程实施；黄土高原

文章编号：1000－6060(2023)12－1939－12(1939～1950)

全球气候变化对人类健康、生存环境和社会经济系统产生深远的影响，因而成为各领域研究的热点话题[1-3]。IPCC第六次评估报告（AR6）揭示1970s以来全球气候增暖幅度比近2000年来任何一个50 a的都要大[1]，且在21世纪中叶前变暖趋势仍将继续[4]。全球变暖加剧背景下，各区域的干湿状况发生了不同程度的变化。降雨量和蒸散发是最常用的反映区域干湿变化的气象组合因子[5-6]；而相对湿度（RH）则从空气水蒸气含量变化的角度来反映干湿状况[7-8]，是影响降水地理分布和强度的关键变量[9]，加之其与大气污染[10]、气候舒适度[11]等密切相关，其时空变化引起了越来越多学者关注。全球范围内年均RH在赤道地区最高，30°N、30°S附近的最低[12]；1970s至2010s期间，全球存在温度升高、RH却呈减小趋势的事实[13-14]。中国年均RH趋势变化以95°W为界线呈西增东减差异[15]。徐丽君等[7]研究发现中国北方干旱区85%站点的年均RH以0.1%·$(10a)^{-1}$~1.9%·$(10a)^{-1}$的幅度减小，与降水变化趋势的非一致性高。李瀚等[16]认为中国西南地区的年均RH降幅达到0.6%·$(10a)^{-1}$，其趋势由2000年之前的轻微上升转为之后的快速下降；南方冬季平均RH同样呈减少趋势，冬季降水量的增加致使川西和青藏高原地区的冬季平均RH有所增加[17]；新疆地区年均RH的变化趋势呈现北疆减少、南疆增加，全区2000s以来年均RH均急剧减少[18]；因环境风场的减弱使得外界向青藏高原提供的水汽有所减弱，进而

收稿日期：2023-03-08； **修订日期**：2023-04-20
基金项目：陕西省科技厅项目（2021KRM033）；陕西教育厅项目（22JK0233，18JK0016）；安康学院校级项目（2021AYKFKT03）资助
作者简介：安彬（1988-），男，在读博士，副教授，主要从事区域环境评价与GIS应用研究. E-mail: leyang1007@126.com

导致年均RH在2000年之后快速减小[19];受城市化进程影响,北京市年均RH呈减少趋势,城区年均RH比郊区低得多[20]。

黄土高原是全球生态环境脆弱带、气候变化敏感区之一[21],也是构建我国"两屏三带"生态安全格局的主体区域[22]。以往研究主要聚焦于黄土高原降水、气温、蒸散发等气象要素的变化分析[23-25],如1960年以来黄土高原气候表现出明显的暖干化[23]、极端高温事件发生频率增加[24],而对该地区RH时空变化研究相对缺乏。自20世纪末退耕还林草和天然林资源保护等生态工程实施以来,黄土高原植被覆盖增加,水源涵养和土壤保持服务持续转好[26],降水量和蒸散发均显著增加[21,25]。鉴于此背景,本文利用黄土高原及其周边地区RH实测资料,利用趋势分析、敏感性分析和空间插值等方法分析退耕还林草等生态工程实施前后RH时空变化特征,并探讨RH与地理因子、气象要素之间关系,为深入了解该区域的干湿变化规律提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原(33°41′~41°16′N,100°52′~114°33′E)处于我国西北干旱区向东部季风区的过渡地带,其边界范围东起太行山,南临秦岭,西止青海日月山,北抵阴山,总面积约64×10⁴ km²[23],是世界上最大的黄土聚集区[24]。该地区冬季寒冷干旱,夏季炎热多雨[25],多年平均气温介于7.64~10.24 ℃之间[23],7、8月降水量占多年平均降水量(422.76 mm)的42.9%[21]。该区植被从东南向西北依次由森林向草原过渡[25],多类生态工程叠加导致植被覆盖度持续增加,是我国生态恢复最为显著的区域[26]。

1.2 数据来源

本文逐日RH、降水量、平均气温和风速等实测资料均来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/),并进行了严格的质量核查。依据观测时间最长、年内缺失数据低于2%等原则,最终选取了90个代表性气象站点,其中黄土高原范围内有59站(占总数的65.56%),周边邻近地区31站(图1),研究时段确定为1955—2021年(T时段,67 a)。将年内、月内逐日RH均值分别记为年、月均RH序列,季节按照常用的气象学划分标准:3—5月为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季和12—次年2月为冬季。此外,依据黄土高原分中心(http://loess.geodata.cn/)提供的生态分区界线,进而探讨不同生态区RH差异特征。

1.3 研究方法

1.3.1 线性拟合和空间插值分析 黄土高原RH的变化趋势采用线性拟合方法计算,其显著性检验水

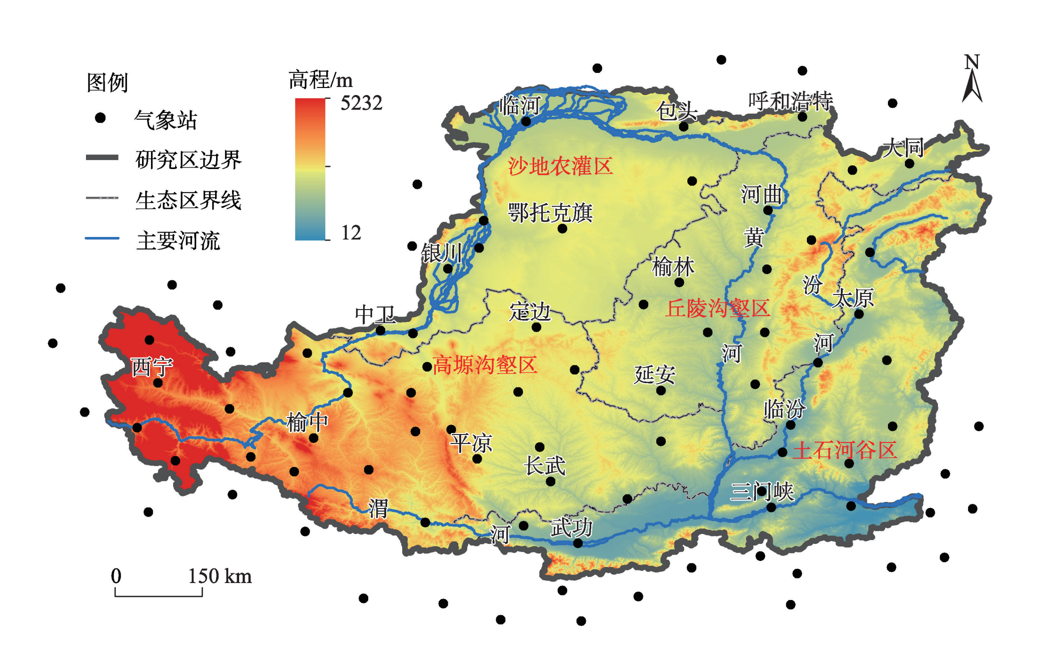


图1 黄土高原及其周边地区气象站位置示意图

Fig. 1 Location diagram of meteorological stations in the Loess Plateau and its surrounding areas

平依据不显著(P>0.05)、显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)标准进行判断[21]；RH空间分布的可视化利用ArcGIS软件反距离权重插值法完成[7]。

1.3.2　季节贡献率　为对比分析黄土高原实施生态工程前(1955—1999年，T_1时段，45 a)、后(2000—2021年，T_2时段，22 a)RH变化差异特征，采用T_2时段RH的平均值及变化趋势减去T_1时段对应值；同时计算RH变化的季节贡献率用来判断某个季节RH变化对年变化的重要程度[8,27]，其计算公式为：

$$\mathrm{Con_S} = \left|\overline{\mathrm{RH}_{T_2S}} - \overline{\mathrm{RH}_{T_1S}}\right| \Big/ \sum\left|\overline{\mathrm{RH}_{T_2S}} - \overline{\mathrm{RH}_{T_1S}}\right| \times 100\% \quad (1)$$

式中：$\mathrm{Con_S}$为RH变化的季节贡献率；$\overline{\mathrm{RH}_{T_1S}}$和$\overline{\mathrm{RH}_{T_2S}}$分别为$T_1$和$T_2$时段的平均RH值。

1.3.3　敏感性分析　敏感性分析方法能够定量地评价黄土高原地区降水等气象要素对RH影响程度[8]，计算公式如下[8,28]：

$$\mathrm{Sen} = \frac{\bar{X}}{\overline{\mathrm{RH}}} \times \frac{\sum(X-\bar{X})(\mathrm{RH}-\overline{\mathrm{RH}})}{\sum(X-\bar{X})^2} \quad (2)$$

式中：Sen为敏感系数，值越大表明气象要素对RH变化影响程度越高；X为气象要素；$\bar{X}$和$\overline{\mathrm{RH}}$分别为气象要素、RH的多年平均值。结合前期研究成果[8]和数据获取情况，本文主要分析降水量、平均气温、风速与RH之间敏感系数。

2　结果与分析

2.1　黄土高原RH时间变化

2.1.1　年际变化　采用线性拟合得到黄土高原1955—2021年(T)、1955—1999年(T_1)和2000—2021年(T_2)时段内年均RH趋势变化情况(图2)。可知，1955—2021年黄土高原年均RH为57.66%，高于我国西北干旱区(50.33%)[8]，低于西南地区(66.44%)[16]；以−0.376%·(10a)$^{-1}$速率呈显著减少趋势(P<0.05)，

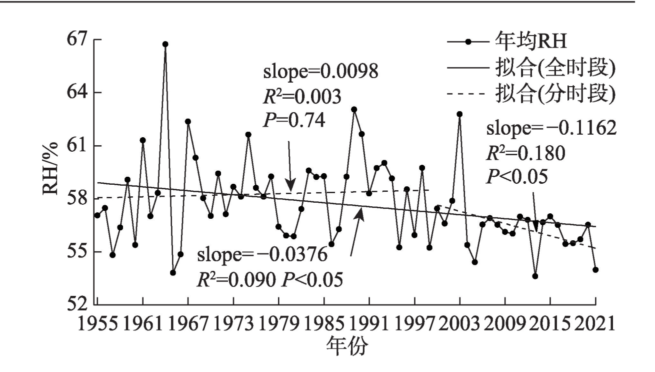


图2　1955—2021年黄土高原地区年均RH变化趋势

Fig. 2　Change trend of annual average RH in the Loess Plateau during 1955—2021

与该区年降水量呈下降趋势特征一致[21]。为研究RH年代际变化情况，将各时序的不同年代、T_1和T_2时段RH均值减去对应T时段RH均值，结果如表1所示。可知，黄土高原年均RH经历了“减弱-增强-减弱”年代际变化特征，1950s中后期年均RH为56.95%，到1960s增加至58.81%，为研究时段内最高；1970s—1990s保持相对稳定，维持在58%以上；之后持续降低，至2010—2021年只有55.89%，为研究时段内最低。T_2时段(2000—2021年)相比T_1时段(1955—1999年)，全区年均RH减少了1.85%，趋势变化由轻微增加[0.098%·(10a)$^{-1}$]转为急剧减少[−1.162%·(10a)$^{-1}$]。

2.1.2　季节变化　1955—2021年黄土高原地区秋季平均RH最高，达到65.00%，夏季(63.52%)和冬季(53.18%)次之，春季的48.92%最低(表1)。从四季平均RH的变异系数来看，春季波动变化特征最为明显(10.48%)，其次分别是冬季(9.34%)和秋季(6.59%)，夏季最不明显(4.94%)。黄土高原春、夏、冬季平均RH皆呈减少趋势，减少幅度依次为春季[−0.945%·(10a)$^{-1}$]>夏季[−0.294%·(10a)$^{-1}$]>冬

表1　黄土高原地区相对湿度(RH)年代际变化情况

Tab. 1　Interdecadal variation of RH in the Loess Plateau　/%

时序	T时段		与T时段的相对差值								
	均值	变异系数	1955—1959年	1960s	1970s	1980s	1990s	2000s	2010—2021年	T_1时段	T_2时段
年均	57.66	4.23	−0.71	1.15	0.78	0.46	0.69	−0.60	−1.77	0.61	−1.24
春季	48.92	10.48	−0.99	3.46	0.74	1.18	2.99	−3.60	−3.56	1.75	−3.58
夏季	63.52	4.94	0.48	−0.36	0.41	1.82	1.18	−1.59	−1.41	0.73	−1.49
秋季	65.00	6.59	−4.07	2.46	0.47	−0.12	−1.62	0.58	0.23	−0.19	0.39
冬季	53.18	9.34	−0.39	−0.43	1.42	0.07	−0.09	1.92	−2.25	0.17	−0.35

注：T时段为1955—2021年，T_1和T_2时段分别为黄土高原实施生态工程前(1955—1999年)、后(2000—2021年)两时段。

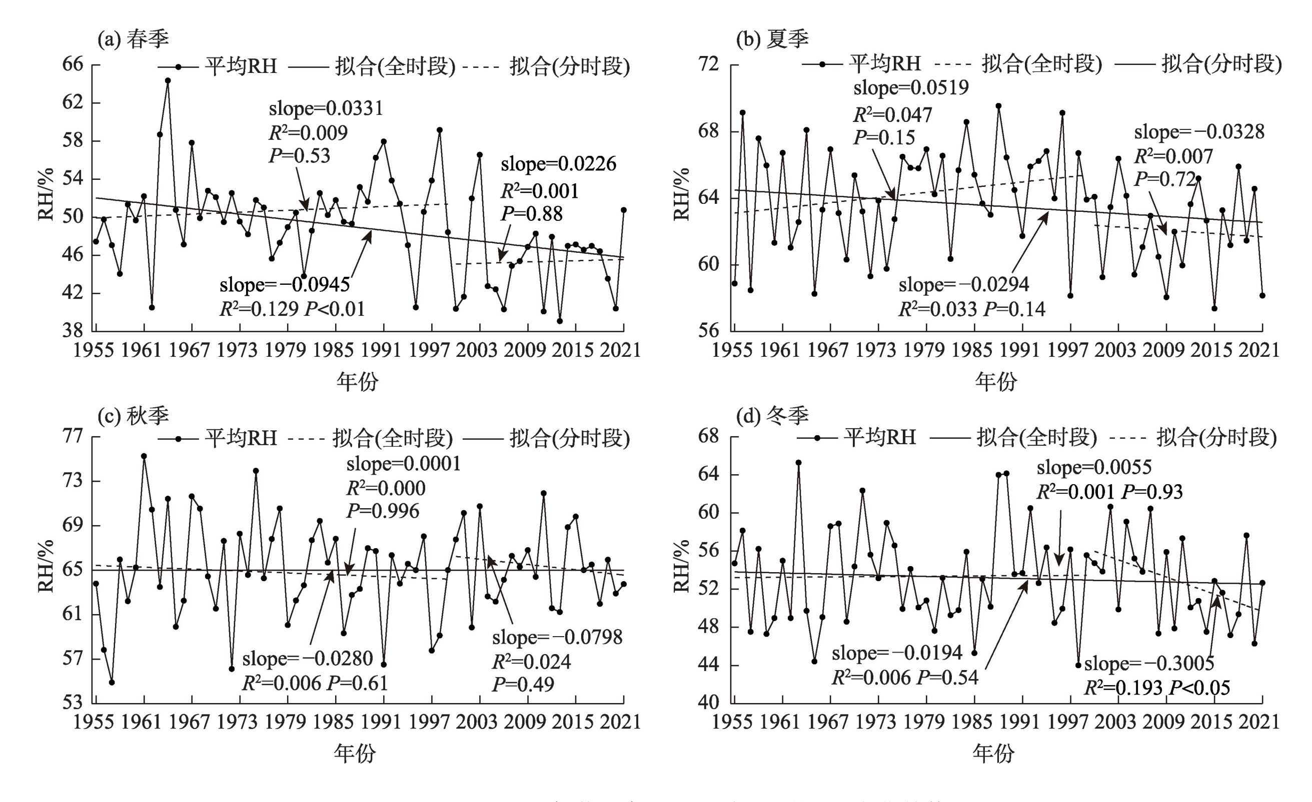


图3 1955—2021年黄土高原地区季节平均RH变化趋势

Fig. 3 Change trends of seasonal average RH in the Loess Plateau during 1955—2021

季[−0.194%·(10a)$^{-1}$],仅有春季减少趋势表现为极显著(P<0.01);秋季平均RH以微弱幅度增加[0.001%·(10a)$^{-1}$](图3)。黄土高原四季平均RH的年代际变化特征存在较大差异(表1),春季与年均RH的年代际变化特征相同,夏季表现为"增强-减弱"交替变化,最高与最低值分别出现在1980s、2000s;秋、冬季均呈"减弱-增强"交替变化,其中秋季最高与最低值皆出现在1970s之前,冬季则出现在1990s之后。

T_2时段相比T_1时段,黄土高原春、夏和冬季平均RH均有所降低,分别降低了5.33%、2.22%、0.52%,秋季平均RH则增高了0.58%(表1)。通过计算季节贡献率可知,春季平均RH对年均RH变化的贡献率最大(61.54%),其次是夏季(25.69%),秋、冬季贡献率大致相当。T_1时段,春、夏和冬季平均RH均表现出不显著增大趋势(P>0.05),而秋季呈不显著减小趋势;T_2时段,除春季以略低于T_1阶段的增幅保持增加趋势外(P>0.05),其余三季同年均RH变化特征一致,均表现为减少趋势。

2.2 黄土高原RH空间变化

2.2.1 年际空间变化 为分析黄土高原RH空间分布规律,计算所有站点的年均RH及其变化趋势,再利用反距离权重插值并裁剪得到黄土高原年均RH及其变化趋势的空间分布图(图4)。黄土高原年均RH整体自南向北逐渐降低,表现出明显的纬向地带性空间格局(图4a),其中甘肃景泰站年均RH(46.59%)为各站最低,陕西武功站(70.76%)最高。黄土高原大部分地区年均RH以减小趋势为主,其中呈显著以上的站点达到26个,以宁夏银川站[−1.842%·(10a)$^{-1}$]降幅最为明显;20.34%气象站点的年均RH呈增大趋势,集中分布在高塬沟壑区的西部,以山西河曲站[1.321%·(10a)$^{-1}$]增幅最为明显(图4b)。

2.2.2 季节空间变化 黄土高原春、夏和秋季平均RH空间分布格局特征与年均相似,均表现为南高北低规律(图5)。具体来看,春季平均RH集中在40%~55%之间,其中内蒙古鄂托克旗站(35.92%)最低,陕西武功站(68.41%)最高,二者相差32.49%,为各季最大。夏季平均RH集中在55%~70%之间,其中甘肃景泰站(51.16%)最低,甘肃华家岭站(75.54%)最高。半数以上站点秋季RH均值介于55%~70%之间,其中内蒙古鄂托克旗站(53.25%)最低,陕西武功站(78.49%)最高。冬季平均RH空间上呈南部最高、中北部自东向西逐渐降低规律,其

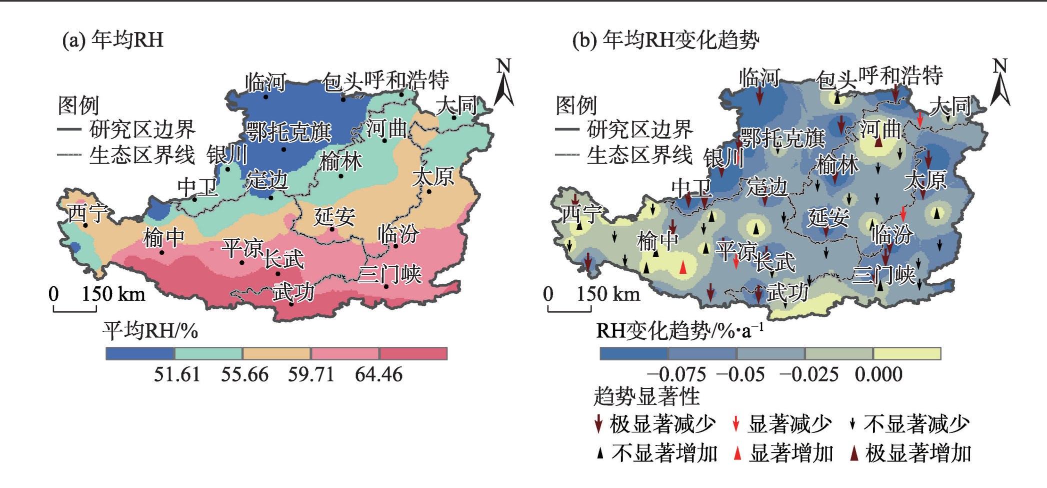


图4　1955—2021年黄土高原地区年均RH及其变化趋势的空间分布

Fig. 4　Spatial distributions of annual average RH and its change trend in the Loess Plateau during 1955—2021

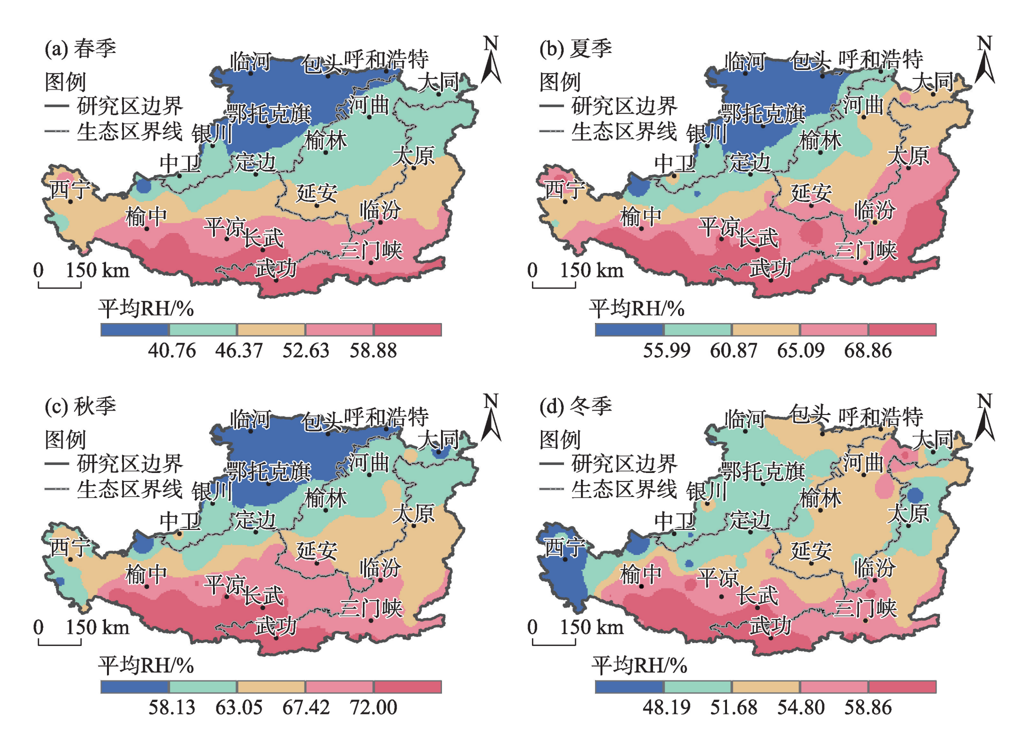


图5　1955—2021年黄土高原地区季节平均RH空间分布特征

Fig. 5　Spatial distributions of seasonal average RH in the Loess Plateau during 1955—2021

中青海贵德站(40.91%)最低,陕西武功站(65.01%)最高,二者相差24.10%,为各季最小。

1955—2021年黄土高原春、夏和冬季各站平均RH皆以减少趋势为主,但空间分布明显不同(图6)。春季平均RH减少趋势呈显著和极显著的站点占比达到67.8%,减少幅度集中在0.6%·$(10a)^{-1}$~1.2%·$(10a)^{-1}$之间,空间上表现出东多西少规律;此外,仅有山西河曲站呈不显著增加趋势[0.16%·$(10a)^{-1}$]。夏季平均RH变化趋势呈南增北减态势,整体上以0~0.6%·$(10a)^{-1}$降幅为主,其中呈减少趋势的站点比例高达70%,西北的贺兰山一带减少趋势表现出极显著特征;仅有山西河曲站[1.19%·$(10a)^{-1}$]、陕西长武站[0.78%·$(10a)^{-1}$]的增加趋势通过极显著水平检验。冬季平均RH变化趋势呈东增西减的空间态势,呈减少趋势的站点数量多达40个,其中77.5%未通过显著水平检验;增加和减少最为明显的站点均在丘陵沟壑地区,分别是山西河曲站[1.40%·$(10a)^{-1}$]、陕西榆林站[−1.92%·$(10a)^{-1}$]。秋季

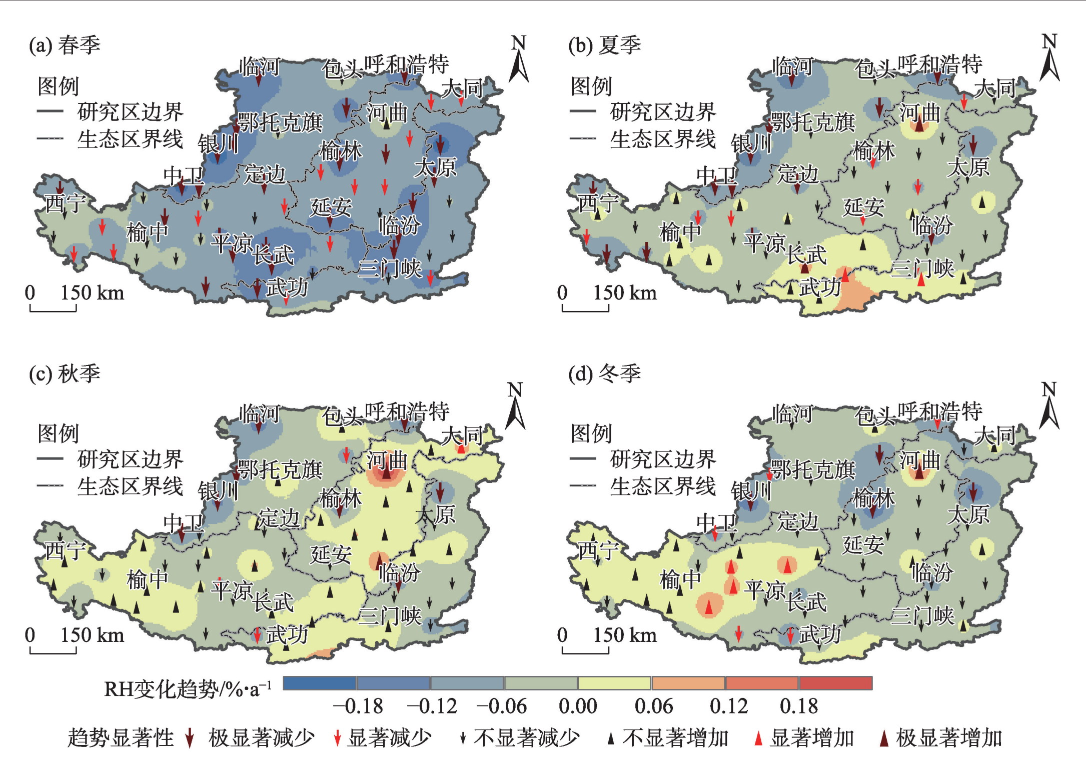


图6 黄土高原季节平均RH变化趋势的空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of trend of seasonal average RH in the Loess Plateau

平均RH变化趋势自东向西呈“减小-增大”相间分布规律，整体上以不显著的变化趋势为主，变化范围以−0.6%·$(10a)^{-1}$~0和0~0.6%·$(10a)^{-1}$分布最广，以山西河曲站[2.45%·$(10a)^{-1}$]和宁夏银川站[−1.43%·$(10a)^{-1}$]趋势变化最为明显。进一步统计发现，黄土高原年、四季平均RH变化趋势都表现减少的站点有24个，集中分布在土石山谷区东部和沙地农灌区西北部，而均呈增加趋势的仅有山西河曲站。

2.3 实施生态工程前后RH空间变化

为了对比实施生态工程前后黄土高原RH空间变化特征，采用T_2时段不同时序RH的平均值、趋势减去T_1时段对应值，结果如图7、图8所示。T_2时段相比T_1时段，黄土高原大部分地区年均RH表现出偏低的变化特征，其偏低程度自东南向西北呈“少-多”相间分布，且以1.2%~2.4%分布范围最广，宁夏银川站偏低程度超过了7%；年均RH偏高零星分布在黄土高原偏南和偏北等地，其中以山西河曲站最为典型(图7a)。在退耕还林草等生态工程实施之后，年均RH趋势变化偏高集中在黄土高原中部内蒙古临河-包头-陕西洛川站的包围区域(图7b)，其中临河站超过了3.5%·$(10a)^{-1}$；趋势变化偏低主要在东部和西南地区分布，且偏低程度呈现西少东多空间态势，尤其是山西河曲、临汾和青海贵德等站超过了−5.6%·$(10a)^{-1}$。此外，在年均RH趋势变化偏低的45个站点中，季节平均RH趋势变化最典型的是四季皆为偏低型，共有18个站点，其次是春秋季偏高-夏冬偏低型。在年均RH趋势变化偏高的站点中，半数站点属于春夏秋季偏高-冬季偏低型。

T_2时段相比T_1时段，黄土高原春、夏和冬季RH均值皆以偏低为主(图8)。春季平均RH偏低程度呈南多北少、东多西少特征，以5.0%~7.5%面积分布最广，其中山西临汾和宁夏银川站超过了10%。夏季平均RH偏低程度自东向西呈“少-多”相间分布规律，介于0~2.5%之间分布最广，内蒙古呼和浩特和宁夏银川站超过了7%；偏高集中在关中平原、陕北偏南地区分布，其中以陕西长武站(2.14%)偏高最多。冬季平均RH以偏低为主，空间上整体表现为东西偏高、中部偏低规律，其中陕西榆林和宁夏银川站的偏低程度超过了6%，甘肃华家岭站偏多幅度达到5.68%。秋季平均RH以偏高为主，集中分布在除研究区东南部、西北等以外的广大地区，其中以山西河曲站(6.35%)偏多幅度最为明显，而内蒙古呼和浩特和宁夏银川站的偏低程度超过了5%。

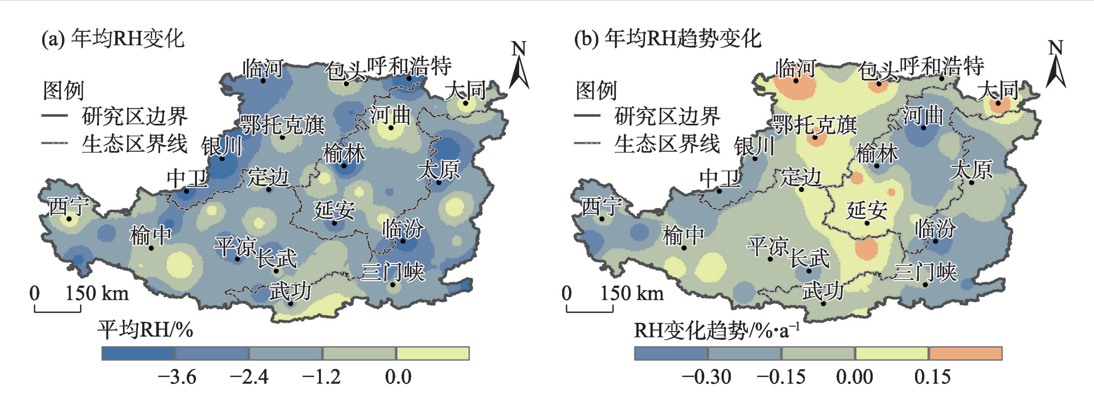


图7　黄土高原实施生态工程前后年均RH变化的空间差异

Fig. 7　Spatial difference of annual average RH change before and after the implementation of ecological engineering in the Loess Plateau

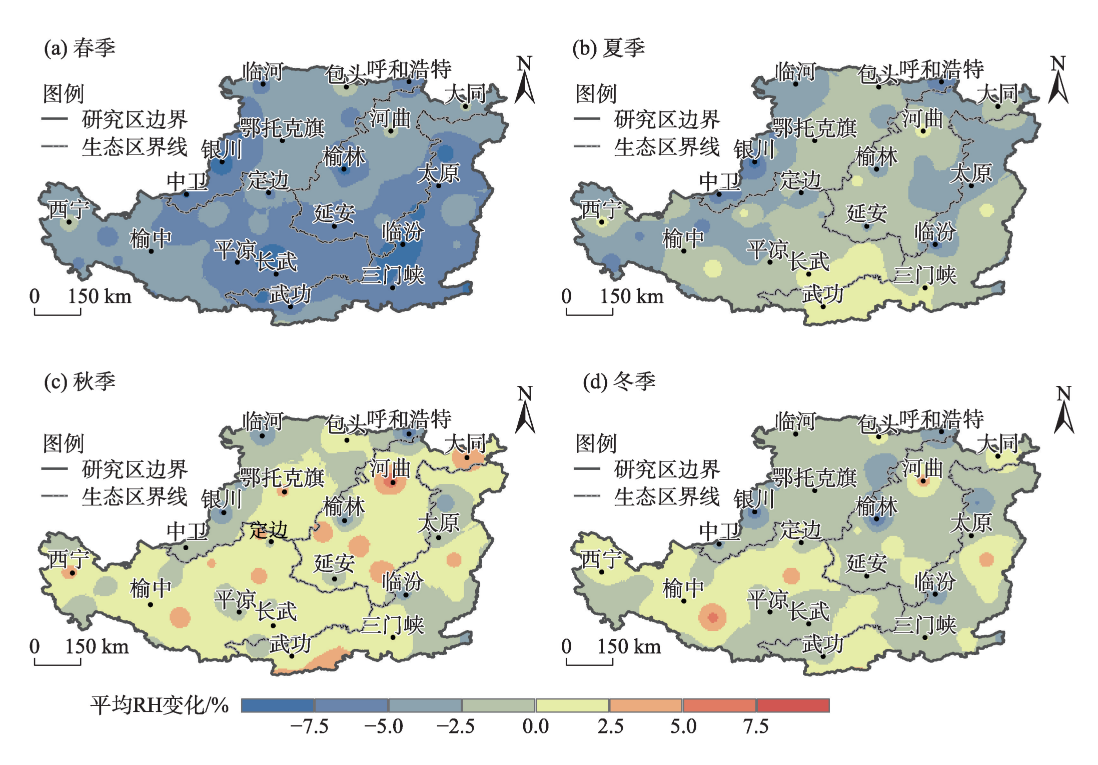


图8　黄土高原实施生态工程前后季节平均RH变化的空间差异

Fig. 8　Spatial difference of seasonal average RH change before and after the implementation of ecological engineering in the Loess Plateau

所有站点单一季节平均RH变化对年均贡献率中，春季主导型最多，其站点数量达到44个，贡献率介于33.15%(宁夏银川站)~73.24%(甘肃平凉站)之间；其次是秋季主导型，其站点数量有11个，以陕西横山站(55.29%)贡献率最大；夏、冬季主导型分别有3个、1个站点。从RH贡献率的季节组合类型来看，春夏季主导型最为突出，其站点数量达到28个，平均贡献率达到79.67%；其次春秋、春冬、秋春季主导型站点各有8个，其平均贡献率分别为67.13%、63.20%和41.80%。此外，春夏冬秋型和春夏秋冬型最为典型，站点数量分别有16个、12个。

3　讨 论

全球范围[12-14]及中国不同研究区[8,15-20]的RH存在明显时空差异，其变化趋势具有非一致特征。本文研究发现1955—2021年黄土高原年均RH以$-0.376\%\cdot(10a)^{-1}$速率减少，其减少幅度高于我国西北干旱区[$-0.125\%\cdot(10a)^{-1}$][8]，但低于西南地区

[−0.570%·(10a)$^{-1}$][16]。黄土高原春、夏、冬季平均RH皆呈减少趋势,减少幅度依次为春季[−0.945%·(10a)$^{-1}$]>夏季[−0.294%·(10a)$^{-1}$]>冬季[−0.194%·(10a)$^{-1}$],秋季平均RH以微弱幅度增加[0.001%·(10a)$^{-1}$]。此外,春季平均RH为各季最低,但其波动特征、趋势变化降幅最为突出,说明春季平均RH变化可能是引起年均变化的重要原因。对于不同生态区而言,所有时序RH均值皆表现为土石河谷区最高,高塬沟壑区和丘陵沟壑区次之,沙地农灌区最低;除高塬沟壑区秋冬季及丘陵沟壑区秋季平均RH呈增加趋势外,其余生态区各时序平均RH均表现为减少趋势(表2)。沙地农灌区年均、春和夏季平均RH都呈极显著减少趋势(P<0.01),土石河谷区年均、春季亦呈极显著减少趋势,而其他生态区仅有夏季的通过了显著检验(P<0.05)。在实施生态工程之后,黄土高原所有生态区年均RH均有所减少,其中沙地农灌区和土石河谷区减少幅度超过了2.6%,加之这些区域整体上逐渐变干旱[29],未来需要更多关注该地区RH等气候要素的变化。

在一定程度上,地理因子影响着降水[30]、气温[31]和蒸散发[26]等气象要素的时空分布,形成复杂多样的气候;而降水量、气温和风速等气象要素与RH之间存在交互影响[8,17,19],加之城镇化快速发展[20]等对地表形态的改变,导致RH存在明显的空间异质性现象。为了探讨海拔等地理因子和降水等气象因子与黄土高原RH的关系,分别计算了RH与地理因子的相关系数、偏相关系数(表3),与气象因子的相关系数及敏感系数(表4)。由表3可知,黄土高原年均及四季平均RH与纬度的相关系数和偏相关系数皆为负值,且相关性均达到极显著(P<0.01);所有年均及多数季节平均RH与经度、海拔呈不显著负相关,可见纬度对黄土高原RH变化具有显著影响。值得注意的是,夏季平均RH与经度、海拔的偏相关性都极显著,表明黄土高原夏季平均RH受各地理因子的协同作用最为明显。

黄土高原年均及四季平均RH与降水量呈极显著正相关(P<0.01),与平均气温、风速多呈负相关,其中年均及春夏季平均RH与平均气温、秋冬季平均RH与风速的相关性达到显著(表4)。黄土高原年均RH对降水量、平均气温的敏感系数分别为0.170、−0.234,均比西北干旱区更为敏感[8];而风速对年均RH影响不大。这表明若黄土高原年降水量增加10%,可诱发年均RH增加1.70%;若年均气温升高10%,可诱发年均RH减少2.34%。因此,在黄土高原年均气温上升10%(与多年平均值相比,上升幅度为0.89 ℃)的情景下,年降水量需要增加13.76%(增加58.19 mm)才能恰好保持年均RH不变。自1960年以来,黄土高原处于年均气温升高[0.32 ℃·(10a)$^{-1}$]、年降水量减少[−1.48 mm·(10a)$^{-1}$]、年均风速减弱[−0.07 m·s^{-1}·(10a)$^{-1}$]的"暖干化"趋势[21,23],分别引

表2 黄土高原不同生态区RH时序变化

Tab. 2 Temporal variation of RH in different ecological regions of the Loess Plateau

生态分区	RH平均值/%					RH变化趋势/%·a^{-1}				
	年均	春季	夏季	秋季	冬季	年均	春季	夏季	秋季	冬季
沙地农灌区	52.29	40.97	57.47	59.34	51.28	−0.0714**	−0.1175**	−0.0741**	−0.0299	−0.0569
丘陵沟壑区	56.00	44.62	62.90	62.68	53.77	−0.0181	−0.0858	−0.0139*	0.0475	−0.0203
土石河谷区	60.51	53.42	66.44	67.67	54.52	−0.0576**	−0.1248**	−0.0295	−0.0281	−0.0405
高塬沟壑区	59.29	51.75	65.10	67.08	53.21	−0.0224	−0.0780	−0.0174*	0.0079	0.0085

注:**、*分别表示RH的变化趋势通过了P<0.01和P<0.05的显著性水平检验。

表3 黄土高原地区RH与地理因子的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between RH and topographic factors in the Loess Plateau

地理因子	相关系数					偏相关系数				
	年均RH	春季平均RH	夏季平均RH	秋季平均RH	冬季平均RH	年均RH	春季平均RH	夏季平均RH	秋季平均RH	冬季平均RH
纬度	−0.742**	−0.840**	−0.685**	−0.761**	−0.373**	−0.774**	−0.847**	−0.817**	−0.765**	−0.390**
经度	−0.018	−0.118	0.051	−0.074	0.133	0.333*	0.286*	0.618**	0.211	0.098
海拔	−0.063	−0.017	0.033	−0.060	−0.232	0.214	0.207	0.552**	0.111	−0.076

注:**、*分别表示相关系数通过了P<0.01和P<0.05的显著性水平检验。下同。

表4 黄土高原地区RH与气候因子的相关系数及敏感系数

Tab. 4 Correlation coefficient and sensitivity coefficient between RH and climatic factors in the Loess Plateau

气象因子	相关系数					敏感系数				
	年均RH	春季平均RH	夏季平均RH	秋季平均RH	冬季平均RH	年均RH	春季平均RH	夏季平均RH	秋季平均RH	冬季平均RH
降水量	0.682**	0.761**	0.816**	0.860**	0.700**	0.170	0.230	0.088	0.177	0.140
平均气温	−0.390**	−0.370**	−0.506**	0.005	−0.203	−0.234	−0.434	−0.698	0.006	0.002
风速	−0.007	0.116	−0.178	−0.283*	−0.407**	0.0003	0.157	−0.099	−0.202	−0.379

起年均RH减少率为5.07%、0.36%、0.01%，其和略高于年均RH实际减少率(−5.25%)。理论上，气温升高能够使空气中可容纳的水汽含量增加[8,19]，但降水量减少、风速减弱直接导致水汽含量偏少[19,32]，这些因素综合引起了RH变化的不确定性。如进入21世纪以来，黄土高原地区气候呈现暖湿化特征，其年均RH反而有所减少。另外，不同季节降水量、平均气温和风速对黄土高原四季平均RH的影响程度不尽相同。春夏季平均RH对平均气温最为敏感，秋冬季对风速最为敏感，其次是降水量，平均气温最小。对于RH变化率最显著的春季而言，平均气温、风速和降水量分别引起其减少了9.74%、3.62%、1.12%，三者之和略低于整体的减少率(−15.80%)。上述气象因子综合变化可能增加黄土高原干旱灾害风险[29]，从而加剧区域水资源供需矛盾、降低农业资源的有效利用[33]。此外，影响黄土高原RH变化的原因极其复杂，可能还受到东亚季风[34]、外界输送水汽含量[19,32]等因素影响。

4 结 论

(1) 1960—2021年黄土高原RH均值呈秋季(65.00%)>夏季(63.52%)>年均(57.66%)>冬季(53.18%)>春季(48.92%)；除秋季平均RH以微弱幅度增加外，年及其他季节皆呈减少趋势，减少幅度依次为春季[$-0.945\%\cdot(10a)^{-1}$]>年均[$-0.376\%\cdot(10a)^{-1}$]>夏季[$-0.294\%\cdot(10a)^{-1}$]>冬季[$-0.194\%\cdot(10a)^{-1}$]。

(2) 空间上，黄土高原年及春夏秋季平均RH均表现为南高北低规律，冬季呈南部最高、中北部自东向西逐渐降低；年均及四季平均RH变化趋势空间分布格局各异，年均和春季平均RH皆以减少趋势为主且减少幅度东多西少，夏季呈北减南增，冬季呈西增东减，秋季东西方向呈减增相间分布。

(3) T_2时段(2000—2021年)相比T_1时段(1955—1999年)，除秋季平均RH略有增加外，黄土高原年均及春夏冬季平均RH不同程度减少；除春季趋势变化保持不变外，年及其余三季均由增大转为减少趋势；所有时序RH均值及趋势变化的空间特征存在较大差异，最典型的趋势变化组合类型是一致偏低型。

(4) 春季平均RH变化可能是引起黄土高原年均变化的重要原因，季节平均RH变化对年均贡献率主导类型是春季单一型和春夏季组合型。

(5) 黄土高原年均及四季平均RH与纬度呈极显著负相关($P<0.01$)，与降水量呈极显著正相关($P<0.01$)，夏季平均RH受各地理因子的协同作用最为明显；年及春夏季平均RH对平均气温最为敏感，秋冬季对风速最为敏感。黄土高原气温升高、降水量减少、风速减弱分别引起年均RH减少率为5.07%、0.36%、0.01%，其和略高于年均RH实际减少率(−5.25%)。

参考文献(References)

[1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis[C]//Lee J Y, Marotzke J, Bala G, et al. Future Global Climate: Scenario-42 Based Projections and Near-Term Information. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[2] 黄存瑞, 刘起勇. IPCC AR6报告解读: 气候变化与人类健康[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 442−451. [Huang Cunrui, Liu Qiyong. Interpretation of IPCC AR6 on climate change and human health[J]. Climate Change Research, 2022, 18(4): 442−451.]

[3] 丑洁明, 董文杰, 延晓冬. 关于气候变化对社会经济系统影响的机理和途径的探讨[J]. 大气科学, 2016, 40(1): 191−200. [Chou Jieming, Dong Wenjie, Yan Xiaodong. The impact of climate change on the socioeconomic system: A mechanistic analysis[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(1): 191−200.]

[4] 周波涛. 全球气候变暖: 浅谈从AR5到AR6的认知进展[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 667−671. [Zhou Botao. Global warming: Scientific progress from AR5 to AR6[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 667−671.]

[5] 张国宏, 张冬峰, 赵永强, 等. 气候变暖背景下山西区域地表干湿状况变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 281−289. [Zhang Guohong, Zhang Dongfeng, Zhao Yongqiang, et al. Changes of dry/wet surfaces in Shanxi Province under global warming[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 281−289.]

[6] 巩杰, 高秉丽, 李焱, 等. 1960—2020年黄河流域气候干湿状况时空分异及变化趋势[J]. 中国农业气象, 2022, 43(3): 165-176. [Gong Jie, Gao Bingli, Li Yan, et al. Spatiotemporal variation of climate dry-wet condition and its potential trend in the Yellow River Basin from 1960 to 2020[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(3): 165-176.]

[7] 徐丽君, 卫琦, 徐俊增, 等. 中国北方干旱区降雨与相对湿度变化趋势的非一致性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(2): 38-44. [Xu Lijun, Wei Qi, Xu Junzeng, et al. Inconsistent change trends between precipitation and relative humidity in arid areas of north China[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(2): 38-44.]

[8] 徐荣潞, 李宝富, 廉丽姝. 1960—2015年西北干旱区相对湿度时空变化与气候要素的定量关系[J]. 水土保持研究, 2020, 27(6): 233-239, 246. [Xu Ronglu, Li Baofu, Lian Lishu. Quantitative relationship between the spatiotemporal change of relative humidity and climatic factors in the arid region of northwest China from 1960 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 233-239, 246.]

[9] 朱亚妮, 曹丽娟, 唐国利, 等. 中国地面相对湿度非均一性检验及订正[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(6): 379-386. [Zhu Yani, Cao Lijuan, Tang Guoli, et al. Homogenization of surface relative humidity over China[J]. Climate Change Research, 2015, 11(6): 379-386.]

[10] 李淑婷, 李霞, 毛列尼·阿依提看, 等. 2017—2019年中天山北坡城市群大气污染及污染天气类型特征[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1082-1092. [Li Shuting, Li Xia, Ayikan Mauren, et al. Characteristics of air pollution and its polluted weather types of urban agglomeration on the north slope of the middle Tianshan Mountains from 2017 to 2019[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1082-1092.]

[11] 于昕冉, 王乃昂. 近60 a甘肃省旅游气候舒适度变化分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(2): 143-150. [Yu Xinran, Wang Nai'ang. Analysis of the changes in tourism climate comfort in Gansu Province from 1955 to 2015[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2021, 57(2): 143-150.]

[12] Alexander R, Hartmut H A, Evan M M. Relative humidity in the troposphere with AIRS[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2014, 71(7): 2516-2533.

[13] Dai A. Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity[J]. Journal of Climate, 2006, 19: 3589-3606.

[14] Hardwick J R, Westra S, Sharma A. Observed relationships between extreme sub-daily precipitation, surface temperature, and relative humidity[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(22): L22805, doi: 10.1029/2010GL045081.

[15] 卢爱刚, 熊友才. 全球气候变化背景下近五十年中国湿度区域变化趋势[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 141-143. [Lu Aigang, Xiong Youcai. Systematic change in air humidity in China over last 50 years under global climate change[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(1): 141-143.]

[16] 李瀚, 韩琳, 贾志军, 等. 中国西南地区地面平均相对湿度变化分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(4): 42-47. [Li Han, Han Lin, Jia Zhijun, et al. The changes of the average relative humidity in southwest China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2016, 36(4): 42-47.]

[17] 曾波, 王钦. 我国南方地区50 a冬季降水和相对湿度特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 828-839. [Zeng Bo, Wang Qin. Analysis of precipitation and relative humidity in winter in south of China in the past 50 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(4): 828-839.]

[18] 何毅, 杨太保, 陈杰, 等. 1955-2012年南北疆气温、降水及相对湿度趋势分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 269-277. [He Yi, Yang Taibao, Chen Jie, et al. Long-term trend of temperature, precipitation and relative humidity in the northern and southern regions of the Xinjiang from 1955 to 2012[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 269-277.]

[19] 谢欣汝, 游庆龙, 林厚博. 近10年青藏高原中东部地表相对湿度减少成因分析[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 642-650. [Xie Xinru, You Qinglong, Lin Houbo. Surface relative humidity decreases and its cause over the Qinghai-Tibetan Plateau in recent ten years[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(3): 642-650.]

[20] 张茵, 余涛, 梁晏祯, 等. 城市化进程中京津冀地区相对湿度时空演变研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(10): 39-47. [Zhang Yin, Yu Tao, Liang Yanzhen, et al. Study on the spatio-temporal evolution of relative humidity in Beijing-Tianjin-Hebei region in the process of urbanization[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2022, 61(10): 39-47.]

[21] 安彬, 肖薇薇, 朱妮, 等. 近60 a黄土高原地区降水集中度与集中期时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1333-1344. [An Bin, Xiao Weiwei, Zhu Ni, et al. Temporal and spatial variations of precipitation concentration degree and precipitation concentration period on the Loess Plateau from 1960 to 2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1333-1344.]

[22] 赵安周, 田新乐. 基于GEE平台的1986—2021年黄土高原植被覆盖度时空演变及影响因素[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2124-2133. [Zhao Anzhou, Tian Xinle. Spatiotemporal evolution and influencing factors of vegetation coverage in the Loess Plateau from 1986 to 2021 based on GEE platform[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(11): 2124-2133.]

[23] 刘荔昀, 鲁瑞洁, 丁之勇, 等. 黄土高原气候变化特征及原因分析[J]. 地球环境学报, 2021, 12(6): 615-631. [Liu Liyun, Lu Ruijie, Ding Zhiyong, et al. Analysis of climate change characteristics and circulation factors in the Loess Plateau[J]. Journal of Earth Environment, 2021, 12(6): 615-631.]

[24] 杨维涛, 孙建国, 康永泰, 等. 黄土高原地区极端气候指数时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1456-1466. [Yang Weitao, Sun Jianguo, Kang Yongtai, et al. Temporal and spatial changes of extreme weather indices in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geog-

raphy, 2020, 43(6): 1456-1466.]

[25] 王凯利, 王志慧, 肖培青, 等. 气候与下垫面变化对黄土高原蒸散发变化的影响评估[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 166-172, 180. [Wang Kaili, Wang Zhihui, Xiao Peiqing, et al. Assessment on the impact of climate and the changes of underlying surface on the evapotranspiration in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 166-172, 180.]

[26] 邵全琴, 刘树超, 宁佳, 等. 2000—2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估[J]. 地理学报, 2022, 77(9): 2133-2153. [Shao Quanqin, Liu Shuchao, Ning Jia, et al. Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000—2019 using remote sensing[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(9): 2133-2153.]

[27] Li B F, Chen Y N, Chen Z S, et al. Why does precipitation in northwest China show a significant increasing trend from1960 to 2010? [J]. Atmospheric Research, 2016, 167: 275-284.

[28] Zheng H X, Zhang L, Zhu R R, et al. Responses of streamflow to climate and land surface change in the headwaters of the Yellow River Basin[J]. Water Resources Research, 2009, 45(7): 641-648.

[29] 樊莉莉, 耿斌, 王吉林, 等. 2001—2020年黄土高原干旱时空动态及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(6): 183-191. [Fan Lili, Geng Bin, Wang Jilin, et al. Temporal and spatial dynamics of drought and its response to climate change in the Loess Plateau from 2001 to 2020[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 183-191.]

[30] 孟清, 白红英, 赵婷, 等. 秦岭山地气候变化的地形效应[J]. 山地学报, 2020, 38(2): 180-189. [Meng Qing, Bai Hongying, Zhao Ting, et al. Topographic characteristic of climate change in the Qinling Mountains, China[J]. Mountain Research, 2020, 38(2): 180-189.]

[31] 蒋艳, 贺新光, 邓宇鹏, 等. 长江流域近地表气温对地理位置和高程的依赖性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(6): 1329-1342. [Jiang Yan, He Xinguang, Deng Yupeng, et al. Dependence analysis of near-surface air temperature on elevation and geographical coordinates for Yangtze River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(6): 1329-1342.]

[32] 赵明华. 黄土高原降水稳定同位素空间分布及水汽来源分析[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020. [Zhao Minghua. Spatial distribution of stable isotopes of precipitation and analysis of water vapor sources in the Loess Plateau[D]. Xianyang: Journal of Northwest A & F University, 2020.]

[33] 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 等. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1080- 1091. [Zhang Baoqing, Tian Lei, Zhao Xi'ning, et al. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the Loess Plateau in China[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 51(7): 1080-1091.]

[34] Wang J X, Gaffen D J. Late-twentieth-century climatology and trends of surface humidity and temperature in China[J]. Journal of Climate, 2001, 14(13): 2833-2845.

Temporal and spatial evolution of relative humidity in the Loess Plateau during 1955—2021

AN Bin[1,2], XIAO Weiwei[1], LIU Yufeng[3], LIU Quanyu[1]

(1. School of Tourism & Environment, Ankang University, Ankang 725000, Shaanxi, China; 2. College of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. School of Geography and Environment, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: The Loess Plateau, a region in China that is highly sensitive to climate change, serves as a focal point for investigating the spatiotemporal evolution of relative humidity (RH). Understanding the interplay between RH and geographical and meteorological factors is essential for comprehending the climate change dynamics within the plateau. This study leverages daily RH observations from 90 meteorological stations in the Loess Plateau and its environs to analyze the temporal and spatial variations in RH from 1960 to 2021, both before and after the implementation of ecological initiatives such as the conversion project of farmland to forest and grass. Using trend analysis, sensitivity analysis, and spatial interpolation, we unveil the following findings: (1) The average annual RH in the Loess Plateau exhibited a notable decrease of $-0.376\%\cdot(10a)^{-1}$ ($P<0.05$) from 1955 to 2021, undergoing a decadal variation characterized by a "weakening-strengthening-weakening" process. While autumn experienced a slight increase, all other seasons displayed a declining trend, with the most pronounced decrease observed in spring [$-0.945\%\cdot(10a)^{-1}$] and the least in winter [$-0.194\%\cdot(10a)^{-1}$]. (2) Spatially, the winter average RH in the Loess Plateau peaked in the south, gradually diminishing from east to west in the central and northern regions. Conversely, other time series demonstrated a gradual decline from south to north. The spatial patterns of the annual and seasonal average RH variation trends in the Loess Plateau were different. (3) Postimplementation of the ecological project, the average RH throughout the year, as well as in spring, summer, and winter, exhibited varying degrees of decrease. The trends in annual, summer, and winter RH shifted from an increasing to a decreasing trajectory. Noteworthy differences emerged in the spatial distribution characteristics of annual and seasonal average RH, coupled with their respective trend changes. The prevailing trend change combination type for all temporal RH patterns was consistently low. (4) The primary seasonal factor influencing long-term changes in annual RH in the Loess Plateau is spring, with spatial dominance primarily by a single dominant type in spring and a combination of dominant types in spring and summer. (5) The annual and seasonal average RH in the Loess Plateau demonstrated a significant negative correlation with latitude ($P<0.01$) and a positive correlation with precipitation ($P<0.01$). The geographical factors exerted the most significant influence on summer average RH. Annual, spring, and summer average RH were most sensitive to average temperature, whereas autumn and winter were most responsive to wind speed.

Key words: relative humidity (RH); interdecadal variation; seasonal contribution rate; sensitivity analysis; the implementation of ecological project; the Loess Plateau